

JP 2018-98152 A 2018.6.21

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2018-98152

(P2018-98152A)

(43) 公開日 平成30年6月21日(2018.6.21)

(51) Int.Cl.		F I		テーマコード (参考)
H05H 13/04	(2006.01)	H05H 13/04	Q	2G085
A61N 5/10	(2006.01)	H05H 13/04	N	4C082
		A61N 5/10	H	

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 22 頁)

(21) 出願番号	特願2016-244844 (P2016-244844)	(71) 出願人	317015294 東芝エネルギーシステムズ株式会社 神奈川県川崎市幸区堀川町72番地34
(22) 出願日	平成28年12月16日(2016.12.16)	(71) 出願人	301032942 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
		(74) 代理人	110001634 特許業務法人 志賀国際特許事務所
		(72) 発明者	松本 宗道 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社 東芝内

最終頁に続く

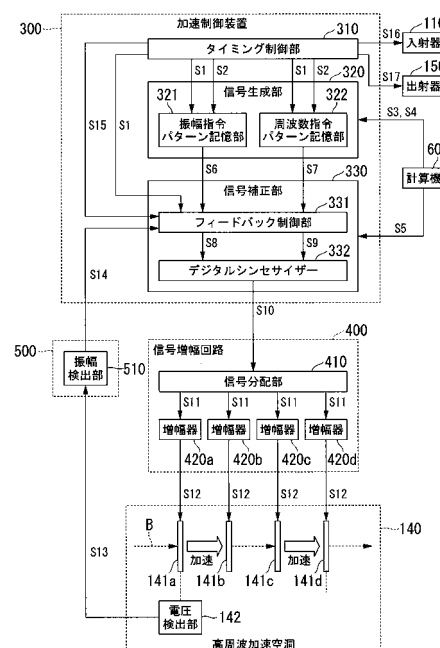
(54) 【発明の名称】 加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置

(57) 【要約】

【課題】荷電粒子ビームの強度を安定化することができる加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置を提供すること。

【解決手段】実施形態の加速器制御装置は、信号生成部と、信号補正部とを持つ。加速器制御装置は、複数の電極を有する高周波加速空洞を用いて荷電粒子ビームを加速する加速器を制御する。前記信号生成部は、前記複数の電極に印加する電圧の振幅を制御するための振幅指令信号を生成する。前記信号補正部は、前記複数の電極のうちの少なくとも一つの電極に印加された電圧の振幅に基づいて、前記信号生成部によって生成された前記振幅指令信号を補正し、補正した前記振幅指令信号を用いて前記複数の電極に出力される高周波信号を生成する。前記信号補正部は、前記荷電粒子ビームを所望のエネルギーに保持する場合には、前記高周波信号の振幅を一定に保持する。

【選択図】図2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

複数の電極を有する高周波加速空洞を用いて荷電粒子ビームを加速する加速器を制御する加速器制御装置であって、

前記複数の電極に印加する電圧の振幅を制御するための振幅指令信号を生成する信号生成部と、

前記複数の電極のうちの少なくとも一つの電極に印加された電圧の振幅に基づいて、前記信号生成部によって生成された前記振幅指令信号を補正し、補正した前記振幅指令信号を用いて前記複数の電極に出力される高周波信号を生成する信号補正部と、を備え、

前記信号補正部は、前記荷電粒子ビームを所望のエネルギーに保持する場合には、前記高周波信号の振幅を一定に保持する

加速器制御装置。

【請求項 2】

前記加速器から前記荷電粒子ビームを出射させるタイミングを制御するタイミング制御部を更に備え、

前記信号生成部は、前記タイミング制御部から入力されたクロック信号に応じて前記振幅指令信号を生成する

請求項 1 記載の加速器制御装置。

【請求項 3】

前記タイミング制御部は、前記加速器から前記荷電粒子ビームを出射させる際には、前記信号生成部への前記クロック信号の出力を停止するとともに、前記クロック信号の出力を停止したことを示すクロック停止信号を前記信号補正部に出力し、

前記信号補正部は、前記タイミング制御部から前記クロック停止信号が入力されたことに応じて、前記高周波信号の振幅を一定に保持する

請求項 2 記載の加速器制御装置。

【請求項 4】

前記信号生成部は、前記振幅指令信号のパターンを示す振幅指令パターン情報を記憶する記憶部を備え、前記タイミング制御部から入力される前記クロック信号に応じて前記記憶部から前記振幅指令パターン情報を読み出すことで、前記振幅指令信号を生成する

請求項 2 または 3 記載の加速器制御装置。

【請求項 5】

前記信号補正部は、

前記信号生成部によって生成された前記振幅指令信号と、前記複数の電極のうちの少なくとも一つの電極に印加された電圧の振幅の値を示す振幅検出信号との差分を保持する第 1 保持部と、

前記差分を積分することによって積分値を算出する積分部と、

前記積分部によって算出された前記積分値を保持する第 2 保持部と、を備え、

前記荷電粒子ビームを所望のエネルギーに保持する場合には、前記第 1 保持部は前記差分を一定に保持するとともに、前記第 2 保持部は前記積分値を一定に保持する

請求項 1 から 4 の何れか一項に記載の加速器制御装置。

【請求項 6】

前記信号補正部は、前記複数の電極のそれぞれに印加された電圧の振幅の平均値を算出し、算出した前記平均値に基づいて前記信号生成部によって生成された前記振幅指令信号を補正する

請求項 1 から 5 の何れか一項に記載の加速器制御装置。

【請求項 7】

前記信号補正部は、一定に保持した前記高周波信号を一定時間強制的に下げること、前記荷電粒子ビームのパンチ状態を抑制する

請求項 1 から 6 の何れか一項に記載の加速器制御装置。

【請求項 8】

10

20

30

40

50

複数の電極を有する高周波加速空洞を用いて荷電粒子ビームを加速する加速器を制御する加速器制御方法であって、

前記複数の電極に印加する電圧の振幅を制御するための振幅指令信号を生成する信号生成工程と、

前記複数の電極のうちの少なくとも一つの電極に印加された電圧の振幅に基づいて、前記信号生成工程で生成された前記振幅指令信号を補正し、補正した前記振幅指令信号を用いて前記複数の電極に出力される高周波信号を生成する信号補正工程と、

前記荷電粒子ビームを所望のエネルギーに保持する場合には、前記高周波信号の振幅を一定に保持する保持工程と

を備える加速器制御方法。

10

【請求項 9】

複数の電極を有する高周波加速空洞を用いて荷電粒子ビームを加速する加速器と、

前記複数の電極に印加する電圧の振幅を制御するための振幅指令信号を生成する信号生成部と、

前記複数の電極のうちの少なくとも一つの電極に印加された電圧の振幅に基づいて、前記信号生成部によって生成された前記振幅指令信号を補正し、補正した前記振幅指令信号を用いて前記複数の電極に出力される高周波信号を生成する信号補正部と、を備え、

前記信号補正部は、前記荷電粒子ビームを所望のエネルギーに保持する場合には、前記高周波信号の振幅を一定に保持する

粒子線治療装置。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置に関する。

【背景技術】

【0002】

一般的に、粒子線治療装置には、荷電粒子ビームを所望のエネルギーまで加速するための加速器が設けられている。加速器には、複数の電極を備える高周波加速空洞が設けられている。粒子線治療装置は、高周波加速空洞に設けられた電極に高周波電力を供給することで荷電粒子ビームを所望のエネルギーまで加速し、加速した荷電粒子ビームを腫瘍等の患部に照射する。

30

【0003】

粒子線治療装置が荷電粒子ビームを患部に照射する際には、荷電粒子ビームの強度を安定化させることが重要である。しかしながら、高周波加速空洞の電極に印加される電圧の振幅の変動によって、患部に照射される荷電粒子ビームの強度が不安定になる場合があった。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

40

【特許文献 1】特開 2008 - 47438 号公報

【特許文献 2】特許第 2799049 号公報

【特許文献 3】特許第 5570164 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明が解決しようとする課題は、荷電粒子ビームの強度を安定化することができる加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0006】

50

実施形態の加速器制御装置は、信号生成部と、信号補正部とを持つ。加速器制御装置は、複数の電極を有する高周波加速空洞を用いて荷電粒子ビームを加速する加速器を制御する。前記信号生成部は、前記複数の電極に印加する電圧の振幅を制御するための振幅指令信号を生成する。前記信号補正部は、前記複数の電極のうちの少なくとも一つの電極に印加された電圧の振幅に基づいて、前記信号生成部によって生成された前記振幅指令信号を補正し、補正した前記振幅指令信号を用いて前記複数の電極に出力される高周波信号を生成する。前記信号補正部は、前記荷電粒子ビームを所望のエネルギーに保持する場合には、前記高周波信号の振幅を一定に保持する。

【図面の簡単な説明】

【0007】

10

【図1】第1の実施形態に係る粒子線治療装置10の全体構成を示すブロック図。

【図2】第1の実施形態に係る加速器制御装置300、信号増幅回路400、振幅検出回路500、および高周波加速空洞140の詳細構成を示すブロック図。

【図3】第1の実施形態に係る振幅指令パターンS3の一例を示す図。

【図4】第1の実施形態に係るフィードバック制御部331の詳細構成を示す図。

【図5】第1の実施形態に係る振幅指令信号S6の一例を示す図。

【図6】第1の実施形態を適用しない場合の、線量モニタ210の測定値の一例を示す図。

【図7】第1の実施形態を適用した場合の、線量モニタ210の測定値の一例を示す図。

【図8】第1の実施形態に係る加速器制御装置300、信号増幅回路400、および振幅検出回路500の動作を示すフローチャート。

20

【図9】第2の実施形態に係る加速器制御装置300、信号増幅回路400、振幅検出回路500、および高周波加速空洞140の詳細構成を示すブロック図。

【図10】第2の実施形態に係るフィードバック制御部331の詳細構成を示す図。

【図11】第3の実施形態に係るフィードバック制御部331の詳細構成を示す図。

【図12】第3の実施形態に係る補正後振幅指令信号S8の一例を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0008】

以下、実施形態の加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置を、図面を参照して説明する。実施形態の加速器制御装置は、粒子線治療装置に適用できる他、荷電粒子ビームを利用する種々の装置に適用可能である。例えば、荷電粒子ビームを照射することにより対象物を加工するエッチング装置等にも適用することができる。

30

【0009】

(第1の実施形態)

図1は、第1の実施形態に係る粒子線治療装置10の全体構成を示すブロック図である。粒子線治療装置10は、荷電粒子ビームを所望のエネルギーまで加速し、加速した荷電粒子ビームを腫瘍等の患部に照射する装置である。粒子線治療装置10は、加速器100と、照射装置200と、加速器制御装置300と、信号増幅回路400と、振幅検出回路500とを備える。

【0010】

40

加速器100は、入射器110と、複数の四極電磁石120aから120hと、複数の偏向電磁石130aから130dと、高周波加速空洞140と、出射器150とを備える。入射器110は、荷電粒子ビームを加速器100内の周回軌道に入射させる。四極電磁石120aから120hは、荷電粒子ビームが周回軌道を安定して周回するように、荷電粒子ビームを収束または発散させる電磁石である。偏向電磁石130aから130dは、荷電粒子ビームを偏向することにより、荷電粒子ビームを加速器100内で周回させる電磁石である。

【0011】

高周波加速空洞140は、真空ダクト内を通過する荷電粒子ビームを加速する。高周波加速空洞140の詳細については後述する。出射器150は、加速器100に設けられた

50

出射用電極に高周波電場を印加することにより、加速器 100 内の周回軌道を周回する荷電粒子ビームの一部を照射装置 200 に向けて出射する。

【0012】

加速器 100 から照射装置 200 までの経路には、複数の四極電磁石 160 a から 160 d と、複数の補正電磁石 170 a から 170 d と、偏向電磁石 180 とが設けられている。四極電磁石 160 a から 160 d は、荷電粒子ビームが、加速器 100 から照射装置 200 までの経路を安定して通過し、照射位置において荷電粒子ビームが目的のビーム径になるように、荷電粒子ビームを収束または発散させる電磁石である。偏向電磁石 180 は、荷電粒子ビームを偏向し、該荷電粒子ビームを加速器 100 から照射装置 200 まで導くための電磁石である。補正電磁石 170 a から 170 d は、加速器 100 から照射装置 200 までの荷電粒子ビームの軌道を補正するための電磁石である。

10

【0013】

照射装置 200 は、治療室に設置され、加速器 100 によって加速された荷電粒子ビームを腫瘍等の患部に照射する装置である。照射装置 200 は、線量モニタ 210 を備える。線量モニタ 210 は、患部に照射される荷電粒子ビームの強度を検出する。

【0014】

加速器制御装置 300 は、加速器 100 内を周回する荷電粒子ビームのエネルギーを制御する装置である。詳細は後述するが、信号増幅回路 400 は、加速器制御装置 300 によって生成された高周波信号を増幅する回路である。また、振幅検出回路 500 は、高周波加速空洞 140 に備える複数の電極のうちの少なくとも一つの電極に印加された電圧の振幅を検出する回路である。

20

【0015】

図 2 は、第 1 の実施形態に係る加速器制御装置 300、信号増幅回路 400、振幅検出回路 500、および高周波加速空洞 140 の詳細構成を示すブロック図である。加速器 100 の高周波加速空洞 140 には、複数の電極が設けられている。ここでは、図 2 に示すように、4 つの電極 141 a から 141 d が設けられている形態を例として説明する。荷電粒子ビーム B は、複数の電極 141 a から 141 d に電圧が印加されることによって加速される。

【0016】

電極 141 a および電極 141 b は対になっており、電極 141 b に印加される電圧の位相は、電極 141 a に印加される電圧の位相に対して 180° 遅れている。また、電極 141 c および電極 141 d は対になっており、電極 141 d に印加される電圧の位相は、電極 141 c に印加される電圧の位相に対して 180° 遅れている。電極 141 a および電極 141 b の電位差と、電極 141 c および電極 141 d の電位差によって、荷電粒子にエネルギーが供給される。これによって、荷電粒子ビーム B は、電極 141 a と電極 141 b との間で加速されるとともに、電極 141 c と電極 141 d との間で加速される。

30

【0017】

例えば、電極 141 a には $1[kVp-p]$ の交流電圧 V_a が印加されており、電極 141 b には交流電圧 V_a とは逆位相の $1[kVp-p]$ の交流電圧 V_b が印加されている。また、電極 141 c には $1[kVp-p]$ の交流電圧 V_c が印加されており、電極 141 d には交流電圧 V_c とは逆位相の $1[kVp-p]$ の交流電圧 V_d が印加されている。このため、電極 141 a から 141 d の全体に印加される電圧（空洞電圧）は、 $4[kVp-p]$ となる。また、交流電圧 V_a から V_d の各々の振幅は $500[V]$ であるため、電極 141 a から 141 d の全体に印加される電圧（空洞電圧）の振幅は、 $2000[V]$ となる。

40

【0018】

高周波加速空洞 140 には、電極 141 a に印加された電圧を検出する電圧検出部 142 が設けられている。電圧検出部 142 は、検出した電圧を示す電圧検出信号 S_{13} を振幅検出回路 500 に出力する。

50

【0019】

例えば、電圧検出部142は、電極141aに印加された電圧の1000分の1の値を、電圧検出信号S13として検出する。具体的に、電極141aに1[kVp-p]の交流電圧Vaが印加されている場合、電圧検出部142は、1[Vp-p]の交流電圧を電圧検出信号S13として検出する。交流電圧Vaの振幅は500[V]であるため、検出した電圧検出信号S13の振幅は0.5[V]である。

【0020】

振幅検出回路500は、振幅検出部510を備える。振幅検出部510は、電圧検出部142から電圧検出信号S13が入力されると、入力された電圧検出信号S13に基づき、電極141aに印加された電圧の振幅を検出する。振幅検出部510は、検出した電圧の振幅を示す振幅検出信号S14を信号補正部330に出力する。なお、本実施形態では、振幅検出回路500を低コスト化するために、電極141bから141dに印加された電圧の振幅を検出する振幅検出部を設けないこととしている。

10

【0021】

加速器制御装置300は、タイミング制御部310と、信号生成部320と、信号補正部330とを備える。タイミング制御部310、信号生成部320、および信号補正部330は、従来公知のハードウェアにより実現される。かかるハードウェアとして、例えば、FPGA(Field-Programmable Gate Array)、LSI(Large Scale Integration)、およびASIC(Application Specific Integrated Circuit)等が挙げられる。

【0022】

20

なお、加速器制御装置300は、CPU(Central Processing Unit)等のプロセッサと、プロセッサが実行するプログラムを格納するプログラムメモリとを備えてもよい。この場合、プロセッサがプログラムメモリに記憶されたプログラムを実行することで、タイミング制御部310、信号生成部320、および信号補正部330を実現してもよい。

【0023】

タイミング制御部310は、加速器100に荷電粒子ビームBを入射するタイミングを制御するとともに、加速器100から荷電粒子ビームBを出射するタイミングを制御する。

【0024】

図2に示されるように、タイミング制御部310は、荷電粒子ビームBを加速器100内の周回軌道に入射する場合には、ビーム入射信号S16を入射器110に出力する。入射器110は、ビーム入射信号S16がタイミング制御部310から入力されると、荷電粒子ビームBを加速器100内の周回軌道に入射する。

30

【0025】

また、タイミング制御部310は、荷電粒子ビームBを加速器100内の周回軌道から出射する場合には、ビーム出射信号S17を出射器150に出力する。出射器150は、ビーム出射信号S17がタイミング制御部310から入力されると、荷電粒子ビームBを加速器100内の周回軌道から照射装置200に向けて出射する。

【0026】

信号生成部320は、振幅指令パターン記憶部321と、周波数指令パターン記憶部322とを備える。操作者が振幅指令パターンS3および周波数指令パターンS4を計算機600に入力すると、計算機600は、入力された振幅指令パターンS3および周波数指令パターンS4を信号生成部320に送信する。信号生成部320は、計算機600から振幅指令パターンS3および周波数指令パターンS4を受信すると、受信した振幅指令パターンS3を振幅指令パターン記憶部321に記憶するとともに、受信した周波数指令パターンS4を周波数指令パターン記憶部322に記憶する。

40

【0027】

ここで、振幅指令パターンS3は、高周波加速空洞140に設けられた複数の電極141aから141dに印加する電圧の振幅を制御するための振幅指令パターンを示すデータである。即ち、振幅指令パターンS3は、電極141aから電極141dに印加される電

50

圧の振幅を指令する振幅指令値の集合であり、特定の順序で実行（出力）される（振幅指令信号 S 6 として読み出される）。周波数指令パターン S 4 は、高周波加速空洞 1 4 0 に設けられた複数の電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に印加する電圧の周波数を制御するための周波数指令パターンを示すデータである。即ち、周波数指令パターン S 4 は、電極 1 4 1 a から電極 1 4 1 d に印加される電圧の周波数を指令する周波数指令値の集合であり、特定の順序で実行（出力）される（周波数指令信号 S 7 として読み出される）。

【 0 0 2 8 】

タイミング制御部 3 1 0 は、リセット信号 S 1 とクロック信号 S 2 とを、振幅指令パターン記憶部 3 2 1 に出力する。リセット信号 S 1 は、振幅指令信号 S 6 を振幅指令パターン S 3 の最初のデータから生成するよう（最初のデータから読み出すよう）にリセットするための信号である。クロック信号 S 2 は、振幅指令信号 S 6 を振幅指令パターン S 3 の次のデータから生成されるよう（次のデータから読み出すよう）に更新する際に用いられる同期信号である。また、タイミング制御部 3 1 0 は、リセット信号 S 1 とクロック信号 S 2 とを、周波数指令パターン記憶部 3 2 2 にも出力する。

10

【 0 0 2 9 】

図 3 は、第 1 の実施形態に係る振幅指令パターン S 3 の一例を示す図である。図 3 に示される振幅指令パターン S 3 において、横軸は時間を示し、縦軸は電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に印加する電圧を制御するための振幅指令値を示す。即ち、図 3 に示す振幅指令パターン S 3 は、図中最左の振幅指令値（最初の振幅指令値）から実行され、クロック信号が入力される度に次の（右隣の）振幅指令値が順に実行される。なお、振幅指令値が増大すると、電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に印加される電圧の振幅を増大させることができ、振幅指令値が減少すると、電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に印加される電圧の振幅を減弱させることができる。

20

【 0 0 3 0 】

詳細は後述するが、図 3 に示される振幅指令パターン S 3 は、振幅指令値が振幅指令値 A 1 まで増大し、その後、振幅指令値 A 2、振幅指令値 A 3、・・・、振幅指令値 A n へと減少するパターンを備える。ここで、リセット信号 S 1 が振幅指令パターン記憶部 3 2 1 に入力されると、振幅指令パターン S 3 の最初の振幅指令値（図 3 の最左の振幅指令値）から順に実行するよう強制される。

30

【 0 0 3 1 】

信号生成部 3 2 0 は、振幅指令パターン記憶部 3 2 1 に記憶された振幅指令パターン S 3 を参照し、タイミング制御部 3 1 0 から入力されたクロック信号 S 2 に応じて振幅指令信号 S 6 を生成する。言い換えると、信号生成部 3 2 0 は、タイミング制御部 3 1 0 から入力されるクロック信号 S 2 に応じて振幅指令パターン記憶部 3 2 1 から振幅指令値を読み出すことで、振幅指令信号 S 6 を生成する。

【 0 0 3 2 】

具体的に、信号生成部 3 2 0 は、クロック信号 S 2 の入力回数をカウントし、カウント値に対応する振幅指令値を振幅指令パターン記憶部 3 2 1 から読み出すことにより、振幅指令信号 S 6 を生成する。信号生成部 3 2 0 は、クロック信号 S 2 がタイミング制御部 3 1 0 から入力される度に、この動作を繰り返す。信号生成部 3 2 0 は、生成した振幅指令信号 S 6 を信号補正部 3 3 0 に出力する。

40

【 0 0 3 3 】

一方、周波数指令パターン記憶部 3 2 2 には、周波数指令パターン S 4 が記憶されている。周波数指令パターン S 4 は、クロック信号 S 2 に応じて変化する。ここで、リセット信号 S 1 が周波数指令パターン記憶部 3 2 2 に入力されると、周波数指令パターン S 4 の最初の周波数指令値から順に実行するよう強制される。信号生成部 3 2 0 は、周波数指令パターン記憶部 3 2 2 に記憶された周波数指令パターンを参照し、タイミング制御部 3 1 0 から入力されたクロック信号 S 2 に応じた周波数指令信号 S 7 を生成する。また、信号生成部 3 2 0 は、生成した周波数指令信号 S 7 を信号補正部 3 3 0 に出力する。

【 0 0 3 4 】

50

なお、タイミング制御部 310 は、振幅指令パターン記憶部 321 および周波数指令パターン記憶部 322 にリセット信号 S1 を出力した場合、信号補正部 330 にもリセット信号 S1 を出力する。また、詳細は後述するが、タイミング制御部 310 は、加速器 100 を周回する荷電粒子ビーム B を所望のエネルギーに保持する場合には、信号生成部 320 へのクロック信号 S2 の出力を停止する。その後、タイミング制御部 310 は、クロック信号 S2 の出力を停止したことを示すクロック停止信号 S15 を、信号補正部 330 に出力する。

【0035】

信号補正部 330 は、フィードバック制御部 331 と、デジタルシンセサイザー 332 とを備える。計算機 600 は、フィードバック制御部 331 によって行われるフィードバック演算に用いられる、比例ゲインや積分ゲインなどの演算設定値 S5 を信号補正部 330 に出力する。また、振幅検出部 510 は、高周波加速空洞 140 の電極 141a に印加された電圧の振幅の検出値を示す振幅検出信号 S14 を、フィードバック制御部 331 に出力する。

【0036】

フィードバック制御部 331 は、計算機 600 から入力された演算設定値 S5 と、振幅検出部 510 から入力された振幅検出信号 S14 とを用いて、信号生成部 320 によって生成された振幅指令信号 S6 を補正する。これによって、フィードバック制御部 331 は、補正後振幅指令信号 S8 を生成する。フィードバック制御部 331 は、生成した補正後振幅指令信号 S8 を、デジタルシンセサイザー 332 に出力する。

【0037】

また、フィードバック制御部 331 は、信号生成部 320 によって生成された周波数指令信号 S7 についても補正し、補正後周波数指令信号 S9 を生成する。フィードバック制御部 331 は、加速器 100 を周回する荷電粒子ビーム B の位相と高周波加速空洞 140 の電圧位相の差の検出値を用いて周波数指令信号 S7 を補正してもよいし、周波数指令信号 S7 を補正しないでそのまま出力してもよい。フィードバック制御部 331 は、生成した補正後周波数指令信号 S9 を、デジタルシンセサイザー 332 に出力する。

【0038】

デジタルシンセサイザー 332 は、フィードバック制御部 331 から入力された補正後振幅指令信号 S8 および補正後周波数指令信号 S9 に基づき、正弦波の高周波信号 S10 を生成する。高周波信号 S10 は、高周波加速空洞 140 の複数の電極 141a から 141d に出力される信号である。デジタルシンセサイザー 332 は、生成した高周波信号 S10 を信号増幅回路 400 に出力する。

【0039】

信号増幅回路 400 は、信号分配部 410 と、複数の増幅器 420a から 420d とを備える。信号分配部 410 は、デジタルシンセサイザー 332 から高周波信号 S10 が入力されると、入力された高周波信号 S10 を増幅器 420a から 420d に分配する。具体的に、信号分配部 410 は、入力された高周波信号 S10 を 4 つの高周波信号 S11 に分割し、分割した高周波信号 S11 を増幅器 420a から 420d の各々に出力する。

【0040】

ここで、増幅器 420a および増幅器 420b は対になっており、増幅器 420c および増幅器 420d は対になっている。信号分配部 410 は、増幅器 420b に出力される高周波信号 S11 の位相を、増幅器 420a に出力される高周波信号 S11 の位相に対して 180° 遅らせる。また、信号分配部 410 は、増幅器 420d に出力される高周波信号 S11 の位相を、増幅器 420c に出力される高周波信号 S11 の位相に対して 180° 遅らせる。

【0041】

増幅器 420a から 420d の各々は、信号分配部 410 から入力された高周波信号 S11 を増幅することで、高周波信号 S12 を生成する。また、増幅器 420a から 420d は、それぞれ、生成した高周波信号 S12 を高周波加速空洞 140 に設けられた電極 1

10

20

30

40

50

4 1 a から 1 4 1 d に出力する。これによって、荷電粒子ビーム B は、高周波加速空洞 1 4 0 内で加速される。

【 0 0 4 2 】

図 4 は、第 1 の実施形態に係るフィードバック制御部 3 3 1 の詳細構成を示す図である。フィードバック制御部 3 3 1 は、減算部 3 6 0 と、第 1 保持部 3 6 1 と、第 1 乗算部 3 6 2 と、加算部 3 6 3 と、積分停止部 3 6 4 と、積分部 3 6 5 と、第 2 保持部 3 6 6 と、第 2 乗算部 3 6 7 と、初期化部 3 6 8 とを備える。

【 0 0 4 3 】

まず、クロック停止信号 S 1 5 がタイミング制御部 3 1 0 からフィードバック制御部 3 3 1 に入力されていない場合における、フィードバック制御部 3 3 1 の処理について説明する。減算部 3 6 0 は、信号生成部 3 2 0 から入力された振幅指令信号 S 6 と、振幅検出部 5 1 0 から入力された振幅検出信号 S 1 4 との差分 D を算出し、算出した差分 D を第 1 保持部 3 6 1 および積分部 3 6 5 に出力する。第 1 保持部 3 6 1 は、減算部 3 6 0 から入力された差分 D を第 1 乗算部 3 6 2 に出力する。

【 0 0 4 4 】

フィードバック制御部 3 3 1 には、計算機 6 0 0 から出力された演算設定値 S 5 に基づき、比例ゲイン K_p が予め設定されている。第 1 乗算部 3 6 2 は、第 1 保持部 3 6 1 から入力された差分 D に比例ゲイン K_p を乗算し、乗算値を加算部 3 6 3 に出力する。

【 0 0 4 5 】

一方、積分部 3 6 5 は、減算部 3 6 0 から入力された差分 D を積分することによって積分値を算出し、算出した積分値を第 2 保持部 3 6 6 に出力する。第 2 保持部 3 6 6 は、積分部 3 6 5 から入力された積分値を第 2 乗算部 3 6 7 に出力する。

【 0 0 4 6 】

フィードバック制御部 3 3 1 には、計算機 6 0 0 から出力された演算設定値 S 5 に基づき、積分ゲイン K_I が予め設定されている。第 2 乗算部 3 6 7 は、第 2 保持部 3 6 6 から入力された積分値に積分ゲイン K_I を乗算し、乗算値を加算部 3 6 3 に出力する。

【 0 0 4 7 】

加算部 3 6 3 は、第 1 乗算部 3 6 2 から入力された乗算値に、第 2 乗算部 3 6 7 から入力された乗算値を加算することで、補正後振幅指令信号 S 8 を生成する。加算部 3 6 3 は、生成した補正後振幅指令信号 S 8 をデジタルシンセサイザー 3 3 2 に出力する。

【 0 0 4 8 】

次に、クロック停止信号 S 1 5 がタイミング制御部 3 1 0 からフィードバック制御部 3 3 1 に入力された場合における、フィードバック制御部 3 3 1 の処理について説明する。タイミング制御部 3 1 0 は、加速器 1 0 0 を周回する荷電粒子ビーム B を所望のエネルギーに保持する場合には、クロック信号 S 2 を停止する。タイミング制御部 3 1 0 は、クロック信号 S 2 を停止した場合、フィードバック制御部 3 3 1 にクロック停止信号 S 1 5 を出力する。タイミング制御部 3 1 0 から出力されたクロック停止信号 S 1 5 は、フィードバック制御部 3 3 1 の第 1 保持部 3 6 1、積分停止部 3 6 4、および第 2 保持部 3 6 6 に入力される。

【 0 0 4 9 】

減算部 3 6 0 は、信号生成部 3 2 0 から入力された振幅指令信号 S 6 と、振幅検出部 5 1 0 から入力された振幅検出信号 S 1 4 との差分 D を算出し、算出した差分 D を第 1 保持部 3 6 1 および積分部 3 6 5 に出力する。

【 0 0 5 0 】

第 1 保持部 3 6 1 は、クロック停止信号 S 1 5 が入力されると、クロック停止信号 S 1 5 が入力される直前の差分 D を保持し、保持した差分 D を第 1 乗算部 3 6 2 に出力する。第 1 保持部 3 6 1 は、クロック停止信号 S 1 5 が入力されなくなるまで、差分 D を一定に保持し続ける。第 1 乗算部 3 6 2 は、第 1 保持部 3 6 1 から入力された差分 D に比例ゲイン K_p を乗算し、乗算値を加算部 3 6 3 に出力する。

【 0 0 5 1 】

積分停止部 364 は、クロック停止信号 S15 が入力されると、積分停止信号を積分部 365 に出力する。積分部 365 は、積分停止部 364 から積分停止信号が入力されると、差分 D を積分する積分処理を停止する。

【0052】

一方、第 2 保持部 366 は、クロック停止信号 S15 が入力されると、クロック停止信号 S15 が入力される直前の積分値を保持し、保持した積分値を第 2 乗算部 367 に出力する。第 2 保持部 366 は、クロック停止信号 S15 が入力されなくなるまで、積分値を一定に保持し続ける。第 2 乗算部 367 は、第 2 保持部 366 から入力された積分値に積分ゲイン K_I を乗算し、乗算値を加算部 363 に出力する。

【0053】

加算部 363 は、第 1 乗算部 362 から入力された乗算値に、第 2 乗算部 367 から入力された乗算値を加算することで、補正後振幅指令信号 S8 を生成する。加算部 363 は、生成した補正後振幅指令信号 S8 をデジタルシンセサイザ 332 に出力する。

【0054】

このように、加速器 100 を周回する荷電粒子ビーム B を所望のエネルギーに保持する場合には、第 1 保持部 361 は減算部 360 から入力された差分 D を一定に保持するとともに、第 2 保持部 366 は積分部 365 から入力された積分値を一定に保持する。これによって、補正後振幅指令信号 S8 が一定に保持される。

【0055】

なお、初期化部 368 は、タイミング制御部 310 からリセット信号 S1 が入力されると、初期化指令信号を積分部 365 に出力する。積分部 365 は、初期化部 368 から初期化指令信号が入力されると、算出した積分値を 0 にする。これによって、初期化部 368 は、積分部 365 によって算出された積分値を初期化することができる。

【0056】

次に、加速器制御装置 300 によって行われる処理について具体的に説明する。振幅指令パターン記憶部 321 には、図 3 に示される振幅指令パターン S3 が記憶されている。

【0057】

タイミング制御部 310 は、荷電粒子ビーム B を加速する際には、リセット信号 S1 を信号生成部 320 の振幅指令パターン記憶部 321 に出力する。振幅指令パターン記憶部 321 は、タイミング制御部 310 からリセット信号 S1 が入力されると、振幅指令パターン S3 の最初のデータから順に出力を開始する。これによって、信号生成部 320 から振幅指令信号 S6 が出力される。振幅指令信号 S6 は、クロック信号 S2 に応じて更新されていく。

【0058】

リセット信号 S1 が出力されるタイミング付近において、信号増幅回路 400 から各電極 141a から 141d に出力される高周波信号 S12 の電力は、荷電粒子ビーム B の入射レベルのエネルギーに相当する電力となっている。この状態で、タイミング制御部 310 がビーム入射信号 S16 を入射器 110 に出力すると、入射器 110 は、荷電粒子ビーム B を加速器 100 内の周回軌道に入射させる。その後、振幅指令信号 S6 および周波数指令信号 S7 に応じて荷電粒子ビーム B にエネルギーが与えられ、荷電粒子ビーム B は加速する。

【0059】

なお、信号生成部 320 は、振幅指令パターン S3 および周波数指令パターン S4 に加えて、四極電磁石 120a から 120h に供給する電流の電流値指令パターンと、偏向電磁石 130a から 130d に供給する電流の電流値指令パターンについても記憶している。信号生成部 320 は、これらの電流値指令パターンに基づいて、四極電磁石 120a から 120h に供給する電流および偏向電磁石 130a から 130d に供給する電流を制御する。これによって、加速器制御装置 300 は、加速器 100 内の荷電粒子ビーム B に対して、リセット、入射、加速、減速を繰り返す。

【0060】

10

20

30

40

50

図 5 は、第 1 の実施形態に係る振幅指令信号 S 6 の一例を示す図である。図 5 に示される振幅指令信号 S 6 において、横軸は時間を示し、縦軸は電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に印加する電圧の振幅指令値を示す。出射器 1 5 0 から荷電粒子ビーム B を出射させる際には、タイミング制御部 3 1 0 は、振幅指令信号 S 6 が荷電粒子ビーム B の出射に必要な振幅を指令する振幅指令値になるまで待つ。例えば、タイミング制御部 3 1 0 は、荷電粒子ビーム B のエネルギーを計測する計測回路を用いて、振幅指令信号 S 6 が荷電粒子ビーム B の出射に必要な振幅を指令する振幅指令値になったか否かを判定する。

【 0 0 6 1 】

例えば、タイミング制御部 3 1 0 は、振幅指令値 A 1 で荷電粒子ビーム B を出射させる場合、振幅指令信号 S 6 が振幅指令値 A 1 に到達したタイミングでクロック信号 S 2 を停止する。これによって、振幅指令信号 S 6 は一定値（振幅指令値 A 1）に保持される。また、タイミング制御部 3 1 0 は、クロック信号 S 2 を停止すると、信号補正部 3 3 0 にクロック停止信号 S 1 5 を出力する。前述したように、信号補正部 3 3 0 は、タイミング制御部 3 1 0 からクロック停止信号 S 1 5 が入力されると、補正後振幅指令信号 S 8 を一定に保持するとともに、補正後周波数指令信号 S 9 を一定に保持する。これによって、信号補正部 3 3 0 は、正弦波である高周波信号 S 1 0 の振幅を一定に保持する。

10

【 0 0 6 2 】

タイミング制御部 3 1 0 は、クロック信号 S 2 を停止している間において、ビーム出射信号 S 1 7 を出射器 1 5 0 に出力する。出射器 1 5 0 は、ビーム出射信号 S 1 7 がタイミング制御部 3 1 0 から入力されると、荷電粒子ビーム B を加速器 1 0 0 内の周回軌道から照射装置 2 0 0 に向けて出射する。これによって、振幅指令値 A 1 で荷電粒子ビーム B を出射させることができる。その後、タイミング制御部 3 1 0 は、信号生成部 3 2 0 へのクロック信号 S 2 の出力を再開するとともに、信号補正部 3 3 0 へのクロック停止信号 S 1 5 の出力を停止する。

20

【 0 0 6 3 】

次に、タイミング制御部 3 1 0 は、振幅指令値 A 2 で荷電粒子ビーム B を出射させる場合、振幅指令信号 S 6 が振幅指令値 A 2 に到達したタイミングでクロック信号 S 2 を停止する。これによって、振幅指令信号 S 6 は一定値（振幅指令値 A 2）に保持される。また、タイミング制御部 3 1 0 は、クロック信号 S 2 を停止すると、信号補正部 3 3 0 にクロック停止信号 S 1 5 を出力する。前述したように、クロック停止信号 S 1 5 が信号補正部 3 3 0 に入力されると、信号補正部 3 3 0 は補正後振幅指令信号 S 8 を一定に保持する。

30

【 0 0 6 4 】

タイミング制御部 3 1 0 は、クロック信号 S 2 を停止している間において、ビーム出射信号 S 1 7 を出射器 1 5 0 に出力する。出射器 1 5 0 は、ビーム出射信号 S 1 7 がタイミング制御部 3 1 0 から入力されると、荷電粒子ビーム B を加速器 1 0 0 内の周回軌道から照射装置 2 0 0 に向けて出射する。これによって、振幅指令値 A 2 で荷電粒子ビーム B を出射させることができる。その後、タイミング制御部 3 1 0 は、信号生成部 3 2 0 へのクロック信号 S 2 の出力を再開するとともに、信号補正部 3 3 0 へのクロック停止信号 S 1 5 の出力を停止する。

40

【 0 0 6 5 】

以上の処理を繰り返すことにより、加速器制御装置 3 0 0 は、電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に所望の振幅の電圧を印加しながら、荷電粒子ビーム B を加速器 1 0 0 から照射装置 2 0 0 に向けて出射させることができる。また、加速器制御装置 3 0 0 は、補正後振幅指令信号 S 8 を一定に保持した状態で加速器 1 0 0 から荷電粒子ビーム B を出射させることで、荷電粒子ビーム B の強度を安定化することができる。

【 0 0 6 6 】

クロック停止信号 S 1 5 がフィードバック制御部 3 3 1 に入力されていない場合、フィードバック制御部 3 3 1 は、振幅検出部 5 1 0 から入力された振幅検出信号 S 1 4（電極 1 4 1 a に印加された電圧の振幅）に基づき、比例・積分フィードバック演算を常時行う。これによって、フィードバック制御部 3 3 1 は、振幅検出信号 S 1 4 が振幅指令信号 S

50

6 に近づくように補正後振幅指令信号 S 8 を変動させる。

【0067】

フィードバック演算によって補正後振幅指令信号 S 8 が変動すると、電極 1 4 1 a から 1 4 1 d の全体に印加される電圧（空洞電圧）の振幅も変動する。このため、荷電粒子ビーム B の強度が不安定となる。

【0068】

荷電粒子ビーム B の強度が不安定となるのは、電極 1 4 1 a から 1 4 1 d が個体差を有するとともに、増幅器 4 2 0 a から増幅器 4 2 0 d も個体差を有するためである。このため、フィードバック制御部 3 3 1 は、電極 1 4 1 a に印加された電圧の振幅が一定値となるように制御したとしても、他の電極 1 4 1 b から 1 4 1 d に印加された電圧の振幅が一定値となるように制御できるとは限らない。したがって、フィードバック制御部 3 3 1 は、電極 1 4 1 a に印加された電圧の振幅を示す振幅検出信号 S 1 4 のみに基づいて、他の電極 1 4 1 b から 1 4 1 d に印加された電圧の振幅を正確に制御することは困難である。

【0069】

図 6 は、第 1 の実施形態を適用しない場合の、線量モニタ 2 1 0 の測定値の一例を示す図である。図 6 において、横軸は時間を示し、縦軸は荷電粒子ビーム B の強度を示す。図 6 に示される例においては、補正後振幅指令信号 S 8 を一定に保持することなく、フィードバック制御部 3 3 1 がフィードバック演算を行いながら、出射器 1 5 0 が荷電粒子ビーム B を出射している。この場合、補正後振幅指令信号 S 8 が変動するため、荷電粒子ビーム B の強度が不安定となる。

【0070】

一方で、本実施形態において、信号補正部 3 3 0 は、加速器 1 0 0 から荷電粒子ビーム B を出射させる際には、補正後振幅指令信号 S 8 を一定に保持する。これによって、信号補正部 3 3 0 は、各電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に出力される高周波信号の振幅を一定に保持することができるため、電極 1 4 1 a から 1 4 1 d の全体に印加される電圧（空洞電圧）の振幅を一定に保持することができる。

【0071】

図 7 は、第 1 の実施形態を適用した場合の、線量モニタ 2 1 0 の測定値の一例を示す図である。図 7 に示されるように、本実施形態によれば、荷電粒子ビーム B の強度の変動を抑制することができ、荷電粒子ビーム B の強度を安定化することができる。

【0072】

図 8 は、第 1 の実施形態に係る加速器制御装置 3 0 0、信号増幅回路 4 0 0、および振幅検出回路 5 0 0 の動作を示すフローチャートである。まず、信号生成部 3 2 0 は、振幅指令パターン記憶部 3 2 1 に記憶された振幅指令パターン S 3 を参照し、クロック信号 S 2 に応じた振幅指令信号 S 6 を生成する（S 1 0 1）。また、信号生成部 3 2 0 は、周波数指令パターン記憶部 3 2 2 に記憶された周波数指令パターン S 4 を参照し、クロック信号 S 2 に応じた周波数指令信号 S 7 を生成する。

【0073】

S 1 0 1 と並行して、振幅検出部 5 1 0 は、電極 1 4 1 a に印加された電圧の振幅を検出し、振幅検出信号 S 1 4 を信号補正部 3 3 0 に出力する（S 1 0 2）。信号補正部 3 3 0 は、振幅検出部 5 1 0 から入力された振幅検出信号 S 1 4 に基づいて、信号生成部 3 2 0 から出力された振幅指令信号 S 6 を補正する（S 1 0 3）。また、信号補正部 3 3 0 は、信号生成部 3 2 0 から出力された周波数指令信号 S 7 についても補正する。

【0074】

信号補正部 3 3 0 は、補正後振幅指令信号 S 8 および補正後周波数指令信号 S 9 に基づき、高周波信号 S 1 0 を生成する（S 1 0 4）。信号増幅回路 4 0 0 は、信号補正部 3 3 0 によって生成された高周波信号 S 1 0 を増幅器 4 2 0 a から 4 2 0 d に分配する（S 1 0 5）。その後、信号増幅回路 4 0 0 は、分配された高周波信号 S 1 1 を増幅する（S 1 0 6）。増幅された高周波信号 S 1 2 は、各電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に出力される。その後、加速器制御装置 3 0 0 は、前述の S 1 0 0 に処理を戻す。

【 0 0 7 5 】

一方、タイミング制御部 3 1 0 は、前述した計測回路を用いて、加速器 1 0 0 を周回する荷電粒子ビーム B が所望のエネルギーに達したか否かを判定する (S 1 0 0)。加速器 1 0 0 を周回する荷電粒子ビーム B が所望のエネルギーに達していないとタイミング制御部 3 1 0 によって判定された場合、前述の S 1 0 3 に処理が進められる。

【 0 0 7 6 】

一方、加速器 1 0 0 を周回する荷電粒子ビーム B が所望のエネルギーに達したとタイミング制御部 3 1 0 によって判定された場合、信号補正部 3 3 0 は、高周波信号 S 1 0 の振幅を一定に保持する (S 1 0 7)。高周波信号 S 1 0 の振幅を一定に保持することで、荷電粒子ビーム B の強度を安定化することができる。その後、前述の S 1 0 3 に処理が進められる。

10

【 0 0 7 7 】

以上説明したように、第 1 の実施形態において、信号生成部 3 2 0 は、複数の電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に印加する電圧の振幅を制御するための振幅指令信号 S 6 を生成する。振幅検出部 5 1 0 は、1 の電極 1 4 1 a に印加された電圧の振幅を検出する。信号補正部 3 3 0 は、振幅検出部 5 1 0 によって検出された振幅に基づいて振幅指令信号 S 6 を補正し、補正後振幅指令信号 S 8 を用いて電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に出力される高周波信号 S 1 0 を生成する。信号補正部 3 3 0 は、加速器 1 0 0 を周回する荷電粒子ビーム B を所望のエネルギーに保持する場合には、高周波信号 S 1 0 の振幅を一定に保持する。これによって、荷電粒子ビーム B の強度を安定化することができる。

20

【 0 0 7 8 】

(第 2 の実施形態)

第 1 の実施形態において、フィードバック制御部 3 3 1 は、電極 1 4 1 a に印加された電圧の振幅のみに基づいて、フィードバック演算を行うこととした。これに対し、第 2 の実施形態において、フィードバック制御部 3 3 1 は、複数の電極に印加された電圧の振幅のそれぞれに基づいて、フィードバック演算を行うこととする。ここで、電極数を特に限定するものではないが、以下の説明では 4 つの電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に印加された電圧の振幅に基づいてフィードバック演算をする場合を例として説明する。即ち、本実施形態において、フィードバック制御部 3 3 1 は、電極 1 4 1 a に印加された電圧の振幅と、電極 1 4 1 b に印加された電圧の振幅と、電極 1 4 1 c に印加された電圧の振幅と、電極 1 4 1 d に印加された電圧の振幅とに基づいて、フィードバック演算を行うこととする。これによって、信号補正部 3 3 0 は、荷電粒子ビーム B の強度をより安定化することができる。以下、第 2 の実施形態について詳細に説明する。

30

【 0 0 7 9 】

図 9 は、第 2 の実施形態に係る加速器制御装置 3 0 0、信号増幅回路 4 0 0、振幅検出回路 5 0 0、および高周波加速空洞 1 4 0 の詳細構成を示すブロック図である。図 9 において、図 2 の各部に対応する部分には同一の符号を付し、説明を省略する。

【 0 0 8 0 】

高周波加速空洞 1 4 0 には、電圧検出部 1 4 2 a から 1 4 2 d が設けられている。電圧検出部 1 4 2 a から 1 4 2 d は、それぞれ、電極 1 4 1 a から 1 4 1 d に印加された電圧を検出する。電圧検出部 1 4 2 a から 1 4 2 d は、それぞれ、検出した電圧を示す電圧検出信号 S 1 3 を振幅検出回路 5 0 0 に出力する。

40

【 0 0 8 1 】

振幅検出回路 5 0 0 は、振幅検出部 5 1 0 a から 5 1 0 d を備える。振幅検出部 5 1 0 a から 5 1 0 d は、それぞれ、電圧検出信号 S 1 3 が入力されると、入力された電圧検出信号 S 1 3 に基づき、電圧検出部 1 4 2 a から 1 4 2 d に印加された電圧の振幅を検出する。振幅検出部 5 1 0 a から 5 1 0 d は、それぞれ、検出した電圧の振幅を示す振幅検出信号 S 1 4 を信号補正部 3 3 0 に出力する。

【 0 0 8 2 】

図 1 0 は、第 2 の実施形態に係るフィードバック制御部 3 3 1 の詳細構成を示す図であ

50

る。図10において、図4の各部に対応する部分には同一の符号を付し、説明を省略する。フィードバック制御部331は、減算部360と、第1保持部361と、第1乗算部362と、加算部363と、積分停止部364と、積分部365と、第2保持部366と、第2乗算部367と、初期化部368と、平均演算部369とを備える。

【0083】

まず、クロック停止信号S15がタイミング制御部310からフィードバック制御部331に入力されていない場合における、フィードバック制御部331の処理について説明する。平均演算部369は、振幅検出部510aから510dから入力された振幅検出信号S14の平均値を算出し、算出した平均値を減算部360に出力する。

【0084】

減算部360は、信号生成部320から入力された振幅指令信号S6と、平均演算部369から入力された平均値との差分Dを算出し、算出した差分Dを第1保持部361および積分部365に出力する。

【0085】

第1保持部361は、減算部360から入力された差分Dを第1乗算部362に出力する。第1乗算部362は、第1保持部361から入力された差分Dに比例ゲイン K_p を乗算し、乗算値を加算部363に出力する。

【0086】

一方、積分部365は、減算部360から入力された差分Dを積分し、積分値を第2保持部366に出力する。第2保持部366は、積分部365から入力された積分値を第2乗算部367に出力する。第2乗算部367は、第2保持部366から入力された積分値に積分ゲイン K_i を乗算し、乗算値を加算部363に出力する。

【0087】

加算部363は、第1乗算部362から入力された乗算値に第2乗算部367から入力された乗算値を加算することで、補正後振幅指令信号S8を生成する。加算部363は、生成した補正後振幅指令信号S8をデジタルシンセサイザ332に出力する。

【0088】

次に、クロック停止信号S15がタイミング制御部310からフィードバック制御部331に入力された場合における、フィードバック制御部331の処理について説明する。タイミング制御部310は、加速器100を周回する荷電粒子ビームBを所望のエネルギーに保持する場合には、クロック信号S2を停止する。タイミング制御部310は、クロック信号S2を停止した場合、フィードバック制御部331にクロック停止信号S15を出力する。タイミング制御部310から出力されたクロック停止信号S15は、フィードバック制御部331の第1保持部361、積分停止部364、および第2保持部366に入力される。

【0089】

減算部360は、信号生成部320から入力された振幅指令信号S6と、平均演算部369から入力された平均値との差分Dを算出し、算出した差分Dを第1保持部361および積分部365に出力する。

【0090】

第1保持部361は、クロック停止信号S15が入力されると、クロック停止信号S15が入力される直前の差分Dを保持し、保持した差分Dを第1乗算部362に出力する。第1保持部361は、クロック停止信号S15が入力されなくなるまで、差分Dを一定に保持し続ける。第1乗算部362は、第1保持部361から入力された差分Dに比例ゲイン K_p を乗算し、乗算値を加算部363に出力する。

【0091】

積分停止部364は、クロック停止信号S15が入力されると、積分停止信号を積分部365に出力する。積分部365は、積分停止部364から積分停止信号が入力されると、差分Dを積分する積分処理を停止する。

【0092】

10

20

30

40

50

一方、第2保持部366は、クロック停止信号S15が入力されると、クロック停止信号S15が入力される直前の積分値を保持し、保持した積分値を第2乗算部367に出力する。第2保持部366は、クロック停止信号S15が入力されなくなるまで、積分値を一定に保持し続ける。第2乗算部367は、第2保持部366から入力された積分値に積分ゲイン K_I を乗算し、乗算値を加算部363に出力する。

【0093】

加算部363は、第1乗算部362から入力された乗算値に、第2乗算部367から入力された乗算値を加算することで、補正後振幅指令信号S8を生成する。加算部363は、生成した補正後振幅指令信号S8をデジタルシンセサイザー332に出力する。

【0094】

このように、加速器100を周回する荷電粒子ビームBを所望のエネルギーに保持する場合には、第1保持部361は減算部360から入力された差分Dを一定に保持するとともに、第2保持部366は積分部365から入力された積分値を一定に保持する。これによって、補正後振幅指令信号S8が一定に保持される。

【0095】

複数の電極141aから141dのそれぞれに印加された電圧の振幅は、常時一致していることが理想的である。しかしながら、電極141aから141dは個体差を有するとともに、増幅器420aから増幅器420dも個体差を有する。このため、複数の電極141aから141dのそれぞれに印加された電圧の振幅を、常時一致させることは難しい。

【0096】

本実施形態の信号補正部330は、複数の電極141aから141dのそれぞれに印加された電圧の振幅が一致していない場合であっても、複数の電極141aから141dのそれぞれに印加された電圧の振幅の平均値に基づいて、振幅指令信号S6を補正する。これによって、複数の電極141aから141dのそれぞれに印加された電圧の振幅が常時一致しない場合であっても、荷電粒子ビームBに与えられるエネルギーを一定にすることができる。

【0097】

以上説明したように、第2の実施形態において、振幅検出部510aから510dは、複数の電極141aから141dのそれぞれに印加された電圧の振幅を検出する。信号補正部330は、振幅検出部510aから510dによって検出された振幅の平均値を算出し、算出した平均値に基づいて信号生成部320によって生成された振幅指令信号S6を補正する。これによって、荷電粒子ビームBの強度をより安定化することができる。

【0098】

(第3の実施形態)

第1および第2の実施形態において、信号補正部330は、荷電粒子ビームBを出射させる際には、高周波信号S10の振幅を一定に保持し続けることとした。これに対し、第3の実施形態において、信号補正部330は、一定に保持した高周波信号S10の振幅を一定時間強制的に減弱させることで、荷電粒子ビームBのパンチ状態を抑制することとする。ここで、パンチ状態とは、荷電粒子が集まって塊になった状態を意味する。以下、第3の実施形態について詳細に説明する。

【0099】

図11は、第3の実施形態に係るフィードバック制御部331の詳細構成を示す図である。図11において、図4の各部に対応する部分には同一の符号を付し、説明を省略する。フィードバック制御部331は、減算部360と、第1保持部361と、第1乗算部362と、加算部363と、積分停止部364と、積分部365と、第2保持部366と、第2乗算部367と、初期化部368と、デバンチ部370とを備える。

【0100】

第3の実施形態は、フィードバック制御部331にデバンチ部370が設けられている点で第1の実施形態とは異なる。デバンチ部370には、計算機600から出力された演

10

20

30

40

50

算設定値 S 5 に基づき、待ち時間 T 1 と、デバンチ時間 T 2 と、リキャプチャ時間 T 3 とが予め設定されている。

【 0 1 0 1 】

まず、クロック停止信号 S 1 5 がタイミング制御部 3 1 0 からフィードバック制御部 3 3 1 に入力されていない場合、デバンチ部 3 7 0 は、加算部 3 6 3 からの出力信号を、補正後振幅指令信号 S 8 としてデジタルシンセサイザー 3 3 2 に出力する。

【 0 1 0 2 】

一方、クロック停止信号 S 1 5 がタイミング制御部 3 1 0 からフィードバック制御部 3 3 1 に入力された場合、デバンチ部 3 7 0 は、荷電粒子ビーム B のバンチ状態を抑制するデバンチ処理を行う。デバンチ処理は、一定に保持した高周波信号 S 1 0 を、一定時間強制的に下げる処理である。

10

【 0 1 0 3 】

荷電粒子ビーム B がバンチ状態（荷電粒子の塊の状態）となっている場合、荷電粒子ビーム B が加速器 1 0 0 を周回している間、荷電粒子ビーム B にコヒーレントシンクロトロン振動が発生する。コヒーレントシンクロトロン振動の影響によって、荷電粒子ビーム B が進行方向に振動すると、荷電粒子ビーム B の強度が不安定になる。本実施形態のデバンチ部 3 7 0 は、デバンチ処理を行うことにより荷電粒子ビーム B のバンチ状態を抑制する。これによって、コヒーレントシンクロトロン振動を抑制し、荷電粒子ビーム B の強度を安定化することができる。

【 0 1 0 4 】

20

図 1 2 は、第 3 の実施形態に係る補正後振幅指令信号 S 8 の一例を示す図である。図 1 2 は、補正後振幅指令信号 S 8 の経時変化と、リセット信号 S 1、クロック信号 S 2 およびクロック停止信号 S 1 5 がタイミング制御部 3 1 0 から出力されるタイミングとを、時間軸を揃えて示す。即ち、図 1 2 において横軸は時間を示し、縦軸はそれぞれ補正後振幅指令信号 S 8、リセット信号 S 1、クロック信号 S 2、および、クロック停止信号 S 1 5 の信号強度を示す。出射器 1 5 0 から荷電粒子ビーム B を出射させる際には、タイミング制御部 3 1 0 は、振幅指令信号 S 6 が荷電粒子ビーム B の出射に必要な振幅を指令する振幅指令値になるまで待つ。例えば、タイミング制御部 3 1 0 は、荷電粒子ビーム B のエネルギーを計測する計測回路を用いて、振幅指令信号 S 6 が荷電粒子ビーム B の出射に必要な振幅を指令する振幅指令値になったか否かを判定する。

30

【 0 1 0 5 】

例えば、タイミング制御部 3 1 0 は、振幅指令値 A 1 で荷電粒子ビーム B を出射させる場合、振幅指令信号 S 6 が振幅指令値 A 1 に到達したタイミングでクロック信号 S 2 を停止する。これによって、振幅指令信号 S 6 は一定値（振幅指令値 A 1）に保持される。また、タイミング制御部 3 1 0 は、クロック信号 S 2 を停止すると、信号補正部 3 3 0 にクロック停止信号 S 1 5 を出力する。前述したように、クロック停止信号 S 1 5 が信号補正部 3 3 0 に入力されると、信号補正部 3 3 0 は補正後振幅指令信号 S 8 を一定に保持する。このとき、クロック停止信号 S 1 5 はデバンチ部 3 7 0 にも入力される。

【 0 1 0 6 】

デバンチ部 3 7 0 は、クロック停止信号 S 1 5 が入力されてから待ち時間 T 1 が経過するまで待機する。待ち時間 T 1 が経過するまでの間、デバンチ部 3 7 0 は、加算部 3 6 3 からの出力信号を、補正後振幅指令信号 S 8 としてデジタルシンセサイザー 3 3 2 に出力する。即ち、デバンチ部 3 7 0 は、待ち時間 T 1 が経過するまでの間、信号補正部 3 3 0 から出力される補正後振幅指令信号 S 8 を一定に保持する。クロック停止信号 S 1 5 が入力されてから待ち時間 T 1 が経過すると、デバンチ部 3 7 0 は、デバンチ時間 T 2 が経過するまで補正後振幅指令信号 S 8 を所定値（例えば、待ち時間 T 1 における補正後振幅指令信号 S 8 の 5 % 以下、典型的には 1 % 以下、好ましくは 0 %）まで強制的に下げる。

40

【 0 1 0 7 】

デバンチ部 3 7 0 が補正後振幅指令信号 S 8 を強制的に下げることで、一定に保持した高周波信号 S 1 0 が強制的に下げられる。高周波信号 S 1 0 が下げられると、複数の電極

50

141aから141dのそれぞれに印加される電圧が小さくなる。複数の電極141aから141dのそれぞれに印加される電圧が小さくなると、荷電粒子ビームBはパンチ状態から解放され、荷電粒子が加速器100内に一様に分布する。これによって、荷電粒子ビームBのパンチ状態を抑制することができる。

【0108】

その後、デバンチ部370は、リキャブチャ時間T3が経過するまで補正後振幅指令信号S8を直線的に振幅指令値A1まで増加させるリキャブチャ処理を行う。補正後振幅指令信号S8を振幅指令値A1まで徐々に増加させることによって、荷電粒子ビームBは若干パンチ状態になる。しかしながら、デバンチ処理を行う前の荷電粒子ビームBと比較して、コヒーレントシンクロトロン振動は抑制される。

10

【0109】

本実施形態において、デバンチ部370は、補正後振幅指令信号S8を振幅指令値A1まで急激に増加させるのではなく、リキャブチャ時間T3の間徐々に増加させる。これによって、荷電粒子ビームBに対してスムーズにリキャブチャ処理を行うことができる。

【0110】

なお、デバンチ部370は、信号補正部330（フィードバック制御部331）にリセット信号入力後にクロック停止信号S15が最初に入力されたときにだけ、デバンチ処理を行う。すなわち、図12の例において、デバンチ部370は、振幅指令値A1に対してのみデバンチ処理を行い、振幅指令値A2からAnに対してはデバンチ処理を行わない。デバンチ部370は、荷電粒子ビームBが加速された後、デバンチ処理を1回実施すればコヒーレントシンクロトロン振動を十分抑制できる。逆に、デバンチ部370がデバンチ処理を複数回行うと、加速器100を周回する荷電粒子の量が減ってしまう。このため、デバンチ部370は、クロック停止信号S15が入力された後、1回だけデバンチ処理を行う。これによって、加速器100を周回する荷電粒子の量が大幅に減少するのを防止できるとともに、コヒーレントシンクロトロン振動を抑制することができる。

20

【0111】

以上説明したように、第3の実施形態において、信号補正部330は、一定に保持した高周波信号S10を一定時間強制的に下げることによって、荷電粒子ビームBのパンチ状態を抑制する。これによって、荷電粒子ビームBの強度をより安定化することができる。

【0112】

30

なお、第3の実施形態において、フィードバック制御部331は、電極141aに印加された電圧の振幅のみに基づいて、フィードバック演算を行うこととしたが、これに限られない。例えば、フィードバック制御部331は、第2の実施形態と同様に、複数の電極に印加された電圧の振幅のそれぞれに基づいて、フィードバック演算を行ってもよい。

【0113】

以上説明した少なくともひとつの実施形態によれば、加速器制御装置300は、信号生成部320と、信号補正部330とを持つ。加速器制御装置300は、複数の電極141aから141dを有する高周波加速空洞140を用いて荷電粒子ビームBを加速する加速器100を制御する。信号生成部320は、複数の電極141aから141dに印加する電圧の振幅を制御するための振幅指令信号S6を生成する。信号補正部330は、複数の電極141aから141dのうちの少なくとも一つの電極に印加された電圧の振幅に基づいて、信号生成部320によって生成された振幅指令信号S6を補正することにより、複数の電極141aから141dに出力される高周波信号S10を生成する。信号補正部330は、荷電粒子ビームBを所望のエネルギーに保持する場合には、高周波信号S10の振幅を一定に保持する。これによって、荷電粒子ビームBの強度を安定化することができる。

40

【0114】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、

50

置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

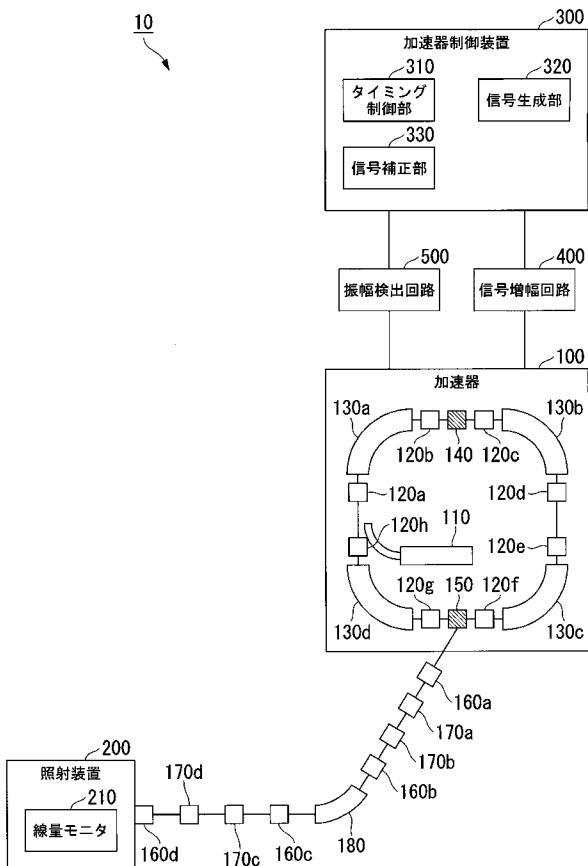
【符号の説明】

【0115】

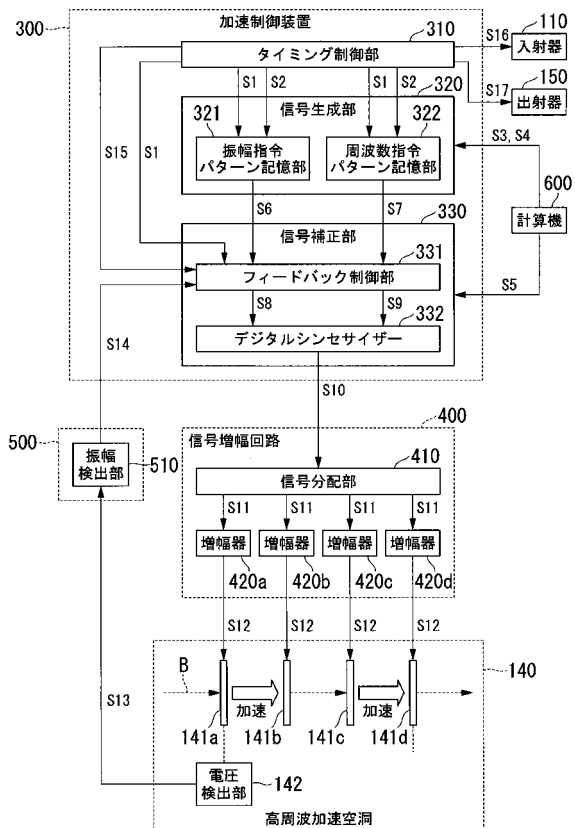
10 ... 粒子線治療装置、100 ... 加速器、110 ... 入射器、140 ... 高周波加速空洞、141a ... 電極、141b ... 電極、141c ... 電極、141d ... 電極、142 ... 電圧検出部、150 ... 出射器、200 ... 照射装置、210 ... 線量モニタ、300 ... 加速器制御装置、310 ... タイミング制御部、320 ... 信号生成部、321 ... 振幅指令パターン記憶部、322 ... 周波数指令パターン記憶部、330 ... 信号補正部、331 ... フィードバック制御部、332 ... デジタルシンセサイザー、360 ... 減算部、361 ... 第1保持部、362 ... 第1乗算部、363 ... 加算部、364 ... 積分停止部、365 ... 積分部、366 ... 第2保持部、367 ... 第2乗算部、368 ... 初期化部、369 ... 平均演算部、370 ... デバランチ部、400 ... 信号増幅回路、410 ... 信号分配部、420a ... 増幅器、420b ... 増幅器、420c ... 増幅器、420d ... 増幅器、500 ... 振幅検出回路、510 ... 振幅検出部

10

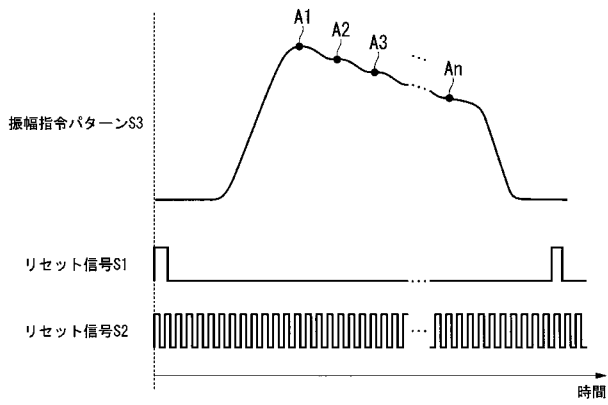
【図1】



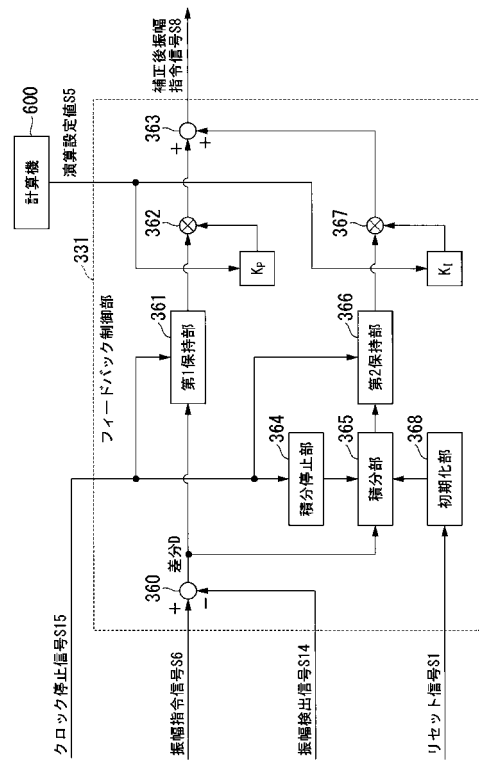
【図2】



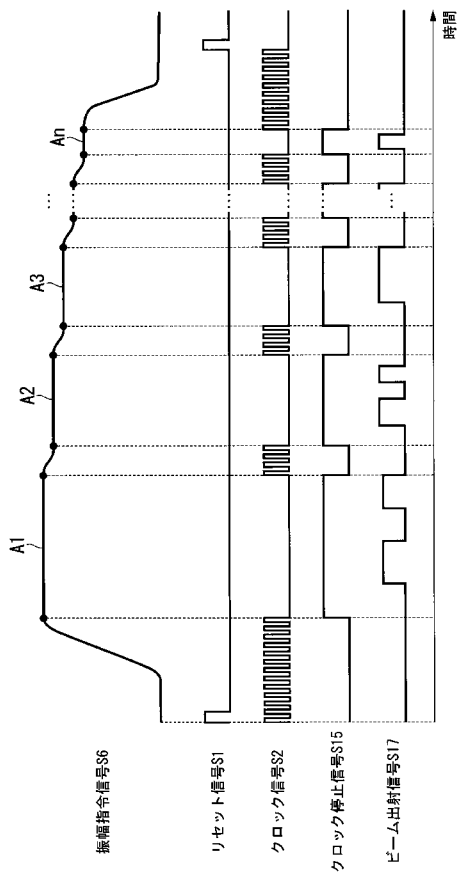
【 図 3 】



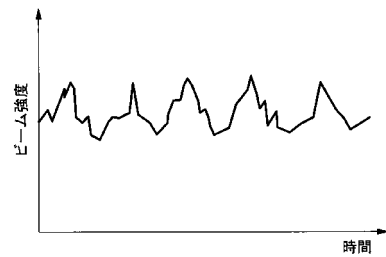
【 図 4 】



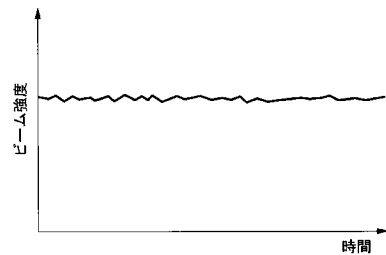
【 図 5 】



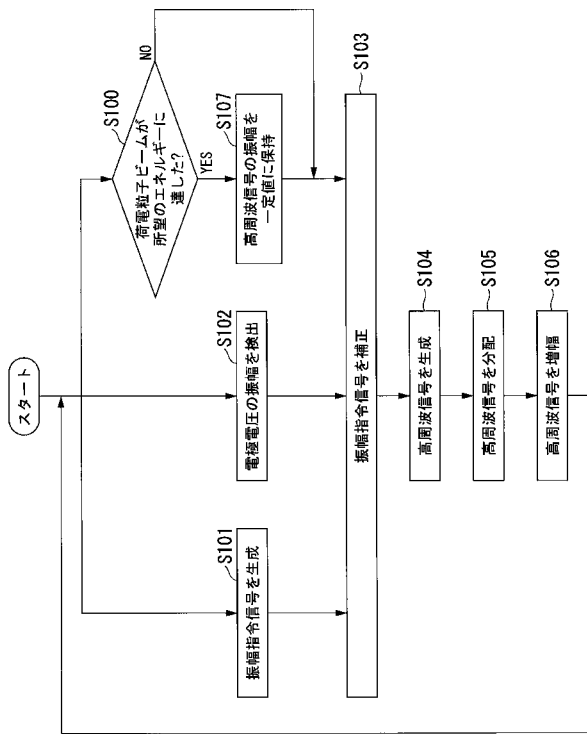
【 図 6 】



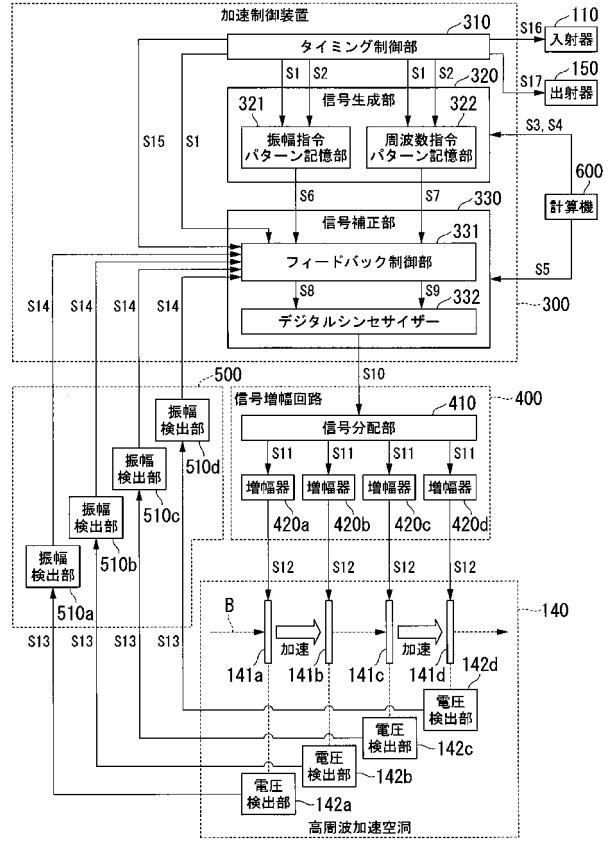
【 図 7 】



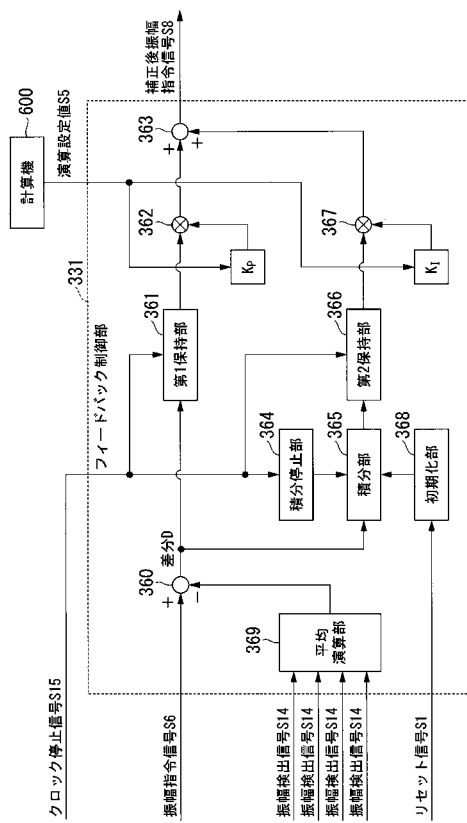
【図 8】



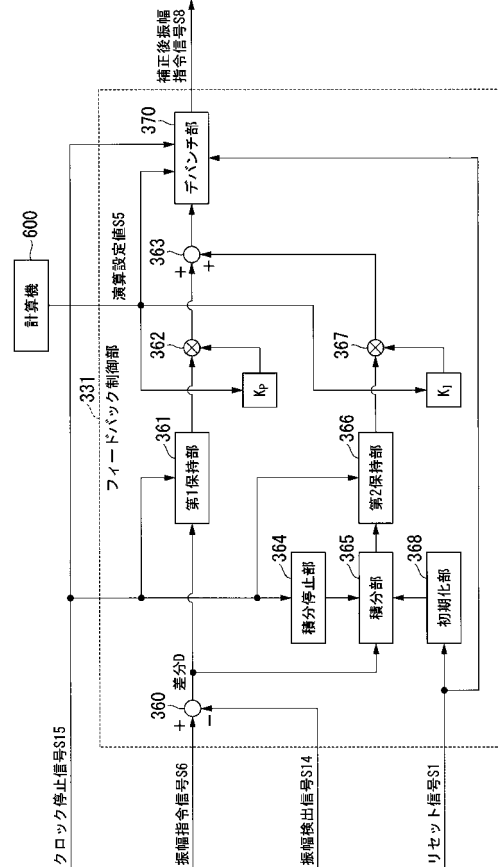
【図 9】



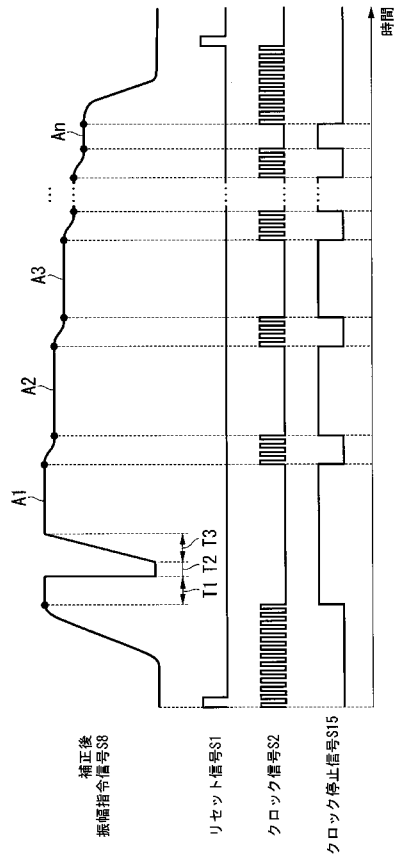
【図 10】



【図 11】



【図 12】



フロントページの続き

- (72)発明者 古川 卓司
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所内
- (72)発明者 水島 康太
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所内
- (72)発明者 塙 勝詞
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- Fターム(参考) 2G085 AA13 BA06 BA13 CA02 CA05 CA24 CA27 EA07
4C082 AA01 AC04 AE01 AG02 AT01